

- короткий цикл смешивания сухих компонентов с жидкими (до 2 мин).

Таким образом, состав смеси, точное дозирование компонентов, точность контроля и время хранения готовой смеси до использования в производстве являются основными факторами, обуславливающими качество отливок, получаемых в формах из жидкостекольных смесей.

**Т.А. Белозерова, М.А. Филиппов,
Г.Н. Плотников, В.В. Кошелев,
Н.Ш. Шадров, Н.И. Красильникова,
О.А. Новикова**

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРЕИМУЩЕСТВЕННО АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Виды износа весьма многообразны, и ни одна из сталей с высоким сопротивлением износу не может быть стойкой при всех видах изнашивания. При износе, сопровождающемся давлением и трением, используют стали с высоким содержанием углерода, в условиях, когда отсутствуют ударные нагрузки, – белые износостойкие чугуны.

В качестве износостойких высокоуглеродистых сталей, работающих в условиях преимущественно абразивного изнашивания с приложением ударных нагрузок пониженной интенсивности, целесообразно применять метастабильные аустенитные стали (МАС). В ходе рабочего нагружения МАС испытывают деформационное мартенситное превращение. Эффект упрочнения МАС в процессе пластической деформации в интервале температур M_n – M_d (M_n – температура начала мартенситного превращения, M_d – температура деформации) определяется следующими факторами:

- 1) деформационным упрочнением аустенита;
- 2) количеством, прочностью и распределением образующихся при деформации α - и ϵ -мартенситных фаз;
- 3) наклепом кристаллов мартенсита деформации [1].

Последние два фактора, вносящие существенный вклад в упрочнение, присущи только сталям с метастабильным аустенитом. Эти стали обладают более высокой способностью к упрочнению, чем близкие по составу стабильные аустенитные стали.

На основе диаграммы мартенситных превращений сталей системы Fe-Mn [2] химический состав опытных плавок выбирался исходя из необходимости получения после закалки метастабильного аустенита. Стабильность аустенита по отношению к образованию мартенсита в процессе охлаждения и пластической деформации регулировалась уменьшением содержания марганца от 5 до 4 % и увеличением содержания углерода от 1,45 до 1,6 % при неизменной концентрации хрома. Легирование марганцевых МАС 1,5–3 % хрома дает увеличение износостойкости изделия в среднем на 25 %.

Снижение концентрации марганца вызывает повышение ЭДУ аустенита, в этом же направлении действует повышение концентрации углерода. Уменьшение способности к наклепу аустенита компенсируется снижением степени стабильности аустенита по отношению к деформационному $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению, которое вносит вклад в упрочнение за счет образования высокоуглеродистого мартенсита в сравнительно небольших количествах. Однако с понижением содержания марганца происходит уменьшение комплекса механических свойств, прежде всего ударной вязкости МАС, особенно при отрицательных температурах, по сравнению со стабильной сталью 110Г13Л. Но в случае, когда отливки работают при комнатной температуре (бронепутеровочные плиты некоторых типов мельниц), значений ударной вязкости $KCU \geq 50$ Дж/см² обычно бывает достаточно для обеспечения конструктивной прочности отливки.

Исходя из сказанного выше, в индукционной печи были выплавлены метастабильные стали 145Г5ХЛ и 160Г4ХЛ. Из слитков изготовили образцы сечением 12х12 мм. Из закаленных при различных температурах проб изготовили ударные и разрывные образцы. Все стали испытывались на абразивную износостойкость на лабораторной установке по методу Н.М. Хрущева. За эталон при испытаниях принималась сталь Гадфильда 110Г13Л.

Температура нагрева под закалку играет важную роль в формировании фазового состава и свойств сталей. Фактический состав аустенита в процессе нагрева определяется не только средним химическим составом стали, но и полнотой перехода углерода и марганца, особенно в межзвенных участках литой стали, в твердый раствор. Полнота перехода углерода и марганца в твердый раствор зависит, в свою очередь, от температуры на-

грева [1, 2], непосредственно влияющей на величину зерна, однородность и стабильность аустенита.

После закалки при температуре 1120 °С по данным рентгеноструктурного анализа структура стали 145Г5ХЛ представляет собой мартенсит и аустенит почти в равных соотношениях. По мере увеличения закалочной температуры повышается растворимость марганца и углерода в аустените и однородность твердого раствора, закалкой от 1160 °С в стали 145Г5ХЛ фиксируется аустенитная структура. При температуре закалки 1200 °С сталь имеет аустенитную структуру (табл. 1), на отдельных участках шлифа наблюдается тенденция к росту зерна. Метастабильная аустенитная сталь 160Г4ХЛ в интервале закалочных температур 1120–1200 °С имеет гетерогенную структуру: аустенит и мартенсит. Причем при увеличении температуры закалки наблюдается снижение количества мартенсита и рост количества остаточного аустенита, а при температуре 1200 °С сталь имеет следующую структуру: 22 % мартенсита, 78 % аустенита (табл. 1).

Твердость исследуемых сталей с повышением закалочных температур понижается и при 1200 °С равняется 22HRC для 145Г5ХЛ и 24HRC для стали 160 Г4ХЛ (табл. 2), что объясняется соотношением аустенита и мартенсита. Величина износостойкости сталей тесно связана как с исходным уровнем твердости перед испытанием, определяемым соотношением количества мартенсита и остаточного аустенита, так и со способностью данного структурного состояния к фрикционному упрочнению вследствие действия абразивных частиц на рабочую поверхность. Для сравнительной оценки сопротивления метастабильных аустенитных сталей абразивному изнашиванию целесообразно использовать величину эффективной микротвердости H_{50} , так как эта характеристика прочности поверхностного слоя материала учитывает наряду с исходной прочностью также и упрочнение, обусловленное фазовыми превращениями в процессе изнашивания, и деформационное упрочнение присутствующих и вновь образующихся фаз, в частности упрочнение от образования мартенсита деформации. Из табл. 1 видно, что, несмотря на различие в исходной твердости, инициированное разными закалочными температурами, особенно для стали 160Г4ХЛ, относительная износостойкость образцов отличается существенно, у стали 145Г5ХЛ она плавно увеличивается. Наличие в структуре сталей мартенсита охлаждения не приводит к существенному росту относительной износостойкости, что подтверждает характеристику мартенсита напряжения как хрупкой структурной составляющей.

Четко прослеживается взаимосвязь между увеличением относительной износостойкости и возрастающим количеством остаточного аустенита

в структуре сталей. Так, более высокая способность к фрикционному упрочнению стали 160Г4ХЛ вызвана повышением содержания углерода в остаточном аустените, вследствие чего образующийся на рабочей поверхности углеродистый мартенсит деформации более твердый и прочный. Однако более высокое содержание углерода вызывает снижение точки M_d и увеличивает деформационную стабильность аустенита.

Таблица 1

Твердость, относительная износостойкость (ε)*
и фазовый состав сталей до и после изнашивания

Сталь	Температура закали, °С	Твердость, HRC	ε	Фазовый состав			
				до износа		после износа	
				α	γ	α	γ
145Г5ХЛ	1120	23	1,33	46	54	68	32
	1160	22	1,40	—	100	20	80
	1200	22	1,47	—	100	20	80
160Г4ХЛ	1160	36	1,38	80	20	85	15
	1200	24	1,61	22	78	45	55

* В качестве эталона испытывалась на абразивный износ сталь 110Г13Л.

Из табл. 2 видно, что с повышением температуры заковки снижается не только предел прочности, но и предел текучести. Причем у стали 145Г5ХЛ при заковке от 1120 °С разность между $\sigma_{пр}$ и σ_t составляет 210 МПа, а при заковке стали от 1200 °С – всего 50 МПа. Вследствие меньшей способности к деформационному упрочнению пластические свойства закаленных метастабильных связей невысокие, с увеличением температуры заковки они практически не изменяются, об этом говорят значения δ , ψ , KCU_{+20} для стали 145 Г5ХЛ (можно предположить, что стабильность аустенита при заковке от 1160 °С тождественна стабильности аустенита, полученного закалкой от температуры 1200 °С).

Таблица 2

Механические свойства исследуемых сталей

Сталь	Температура заковки, °С	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_t , МПа	δ , %	ψ , %	Микротвердость на поверхности износа H_{50} , МПа	KCU_{+20} , Дж/см ²
145 Г5ХЛ	1120	700	490	8	11,0	10650	22
	1160	550	440	3	6,6	9200	21
	1200	500	450	3	8,0	9050	20
160 Г4ХЛ	1160	540	510	—	—	9800	4
	1200	280	—	1	8,0	9250	8

В настоящее время для бронифутеровочных плит некоторых тихоходных типов мельниц применяют сталь 100ГСП после нормализации. Сталь 100 ГСП имеет сравнительно высокую начальную твердость 29 HRC (исходная структура – сорбито-перлитная с сеткой вторичного цементита по границам зерен). Образцы из этой стали при незначительной склонности к упрочнению выдерживают небольшую относительную деформацию около 4 % до разрушения, в то время как образцы опытных метастабильных сталей не разрушались в пределах изученных степеней деформации (27 %). Это позволяет надеяться, что, несмотря на безусловно более низкие значения ударной вязкости опытных сталей по сравнению со сталью 110Г13Л, запас их вязкости будет достаточным для предотвращения хрупкого разрушения бронифутеровочных плит мельниц, изготавливаемых в настоящее время из стали 100ГСП ($\delta=5\%$, $\psi=27\%$, $\epsilon=0,6$, $KCU_{420}=2$ Дж/см²), при повышенном уровне их износостойкости.

Таким образом, для отливок, эксплуатируемых в условиях преимущественно абразивного изнашивания при относительно небольших ударных нагрузках и положительных температурах, в частности для бронифутеровочных плит к тихоходным мельницам, можно использовать метастабильные аустенитные стали типа 145Г5ХЛ ($T_s=1160^\circ\text{C}$). Однако увеличение интенсивности ударных нагрузок или снижение температуры эксплуатации до -40°C требует повышения содержания марганца в стали до 10 %, что снижает ее абразивную стойкость.

Износостойкость при абразивном изнашивании высокоуглеродистых метастабильных марганцевых сталей 145 Г5ХЛ и 160 Г4ХЛ превосходит износостойкость стали 110Г13Л, что можно объяснить повышенной способностью метастабильного аустенита к деформационному мартенситному упрочнению и более высокой эффективной микротвердостью рабочей поверхности. Присутствие мартенсита охлаждения в количестве 50–80 % в углеродистых марганцевых сталях не приводит к увеличению износостойкости при абразивном изнашивании, несмотря на значительное повышение исходной твердости.

Библиографический список

1. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988. 255 с.
2. Филиппов М.А. Метастабильный марганцевый аустенит как структурная основа сталей с высокой стойкостью в условиях динамического контактного нагружения//Металловедение и термическая обработка. 1995. №10. С. 12–15.